第 38 卷第 6 期 生 态 学 报 Vol.38,No.6
2018 年 3 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Mar.,2018

DOI: 10.5846/stxb201703180458
胡芳,杜虎,曾馥平,宋同清,彭晚霞,张芳.典型喀斯特峰丛洼地不同植被恢复对土壤养分含量和微生物多样性的影响.生态学报,2018,38(6):2170-2179.
Hu F, Du H, Zeng F P, Song T Q, Peng W X, Zhang F. Dynamics of soil nutrient content and microbial diversity following vegetation restoration in a typical karst peak-cluster depression landscape. Acta Ecologica Sinica,2018,38(6):2170-2179.

典型喀斯特峰丛洼地不同植被恢复对土壤养分含量和微生物多样性的影响

胡 芳[1,2,3],杜 虎[1,2],曾馥平[1,2],宋同清[1,2,*],彭晚霞[1,2],张 芳[1,2,3]
1 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125
2 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100
3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:以桂西北典型喀斯特峰丛洼地植被恢复过程中草丛、灌丛、次生林、原生林 4 个植被恢复阶段为研究对象,通过测定优势种的根际与非根际的土壤 pH、养分含量及微生物多样性,探讨不同恢复阶段根际土壤养分的富集效应及土壤微生物多样性的变化特征。研究结果表明:(1)4 个恢复阶段的根际与非根际土壤养分均呈现显著差异;土壤有效态养分较全量养分对植物根际微小的变化响应更为灵敏;大多数养分表现出明显的富集效应,AP 和 AK 在原生林的富集率明显高于其他恢复阶段;(2) 4 个恢复阶段细菌 Shannon-Wiener 指数(H)、丰富度指数(S)均高于真菌,根际土壤细菌与真菌 Shannon-Wiener 指数(H)、丰富度指数(S)与 Pielou 均匀度(EH)都高于非根际土壤;(3)4 个恢复阶段土壤 TN 分别与 pH、SOC、AN 呈极显著正相关($P<0.01$),磷素、钾素与土壤微生物多样性呈显著相关($P<0.05$)。可研究结果为西南喀斯特脆弱区土壤生态功能恢复与植被恢复重建提供科学依据。

关键词:土壤养分;微生物多样性;根际;植被恢复;喀斯特峰丛洼地

Dynamics of soil nutrient content and microbial diversity following vegetation restoration in a typical karst peak-cluster depression landscape

HU Fang[1,2,3], DU Hu[1,2], ZENG Fuping[1,2], SONG Tongqing[1,2,*], PENG Wanxia[1,2], ZHANG Fang[1,2,3]
1 *Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha* 410125, *China*
2 *Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang* 547100, *China*
3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: Understanding the dynamics of soil nutrients and microbial diversity following vegetation restoration is fundamentally important for promoting the recovery of soil ecological function and revegetation in degraded karst ecosystems of Southwest China. Here, the study selected four vegetation types which represent four stages of vegetation restoration in a typical karst peak-cluster depression in Mulun natural reservein northwest Guangxi, i.e., grassland, shrubland, secondary forest and primary forest, and investigated soil pH, nutrient content, and the diversity of microorganisms in non-rhizosphere and rhizosphere soil around the dominant species. Significant differences in soil nutrients were observed between rhizosphere and non-rhizosphere at the four vegetation restoration stages. Soil available nutrients respond more sensitively to subtle

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0502405);国家自然科学基金项目(31400412, 31370485, 31370623);广西重点研发计划(桂科 AB16380255, 桂科 AB17129009);广西科技惠民项目(桂科转 1599001-6);广西特聘专家项目
收稿日期:2017-03-18; **网络出版日期**:2017-12-19
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: songtongq@163.com

changes in the rhizosphere than total nutrients. There was an enrichment effect for most soil nutrients. In addition, a dramatically higher accumulation rate was observed for available phosphorous (AP) and available potassium (AK) at primary forest, as compared to other three stages. Both the Shannon-Wiener index (H) and the richness index (S) for bacteria were higher than those for fungi, and the Shannon-Wiener index (H), the richness index (S), and the Pielou evenness index (EH) of bacteria and fungi in the rhizosphere were also higher than those in the non-rhizosphere. Soil total nitrogen (TN) was strongly correlated with pH value, soil organic carbon (SOC), and available nitrogen (AN) (P< 0.01), and phosphorous and potassium correlated positively with the diversity of soil microorganisms.

Key Words: soil nutrients; microbial diversity; rhizoshpere; vegetation restoration; karst peak-cluster depression

根际土是指根系周围、受根系生长影响并且能够从微环境中吸收大量养分的土体[1-3]。土壤微生物都是植物-土壤生态系统中的重要组成部分,而根际又是土壤-植物根系-微生物三者之间相互作用最为活跃的界面[4],根系诱导产生根际土壤养分的变化已被证实[1-3]。根际研究可以有效的了解植物生境的变化,因此受到许多学者的重视。国内对根际的研究开始于 20 世纪 80 年代初,大多数根际研究主要集中在农作物[5-6]和林木[7]根系。在现有的林木研究报道中,已有学者针对于旱荒漠区[8-9]、秦岭山区[10]、黄河三角洲[11]等地区重点研究了土壤酶活性、养分和微生物相关性,通过对根际土壤养分和微生物的认识,来了解喀斯特峰丛洼地地区不同植物对土壤中养分的利用及适应具有重要意义。

喀斯特峰丛洼地地区具有成土慢、土层薄、土被不连续、土壤质地粘重、土壤 pH 值高、生态系统脆弱等特点,以及其生长的植物大都具有嗜钙性、耐旱性和石生性,导致生态系统的稳定性和抗干扰能力差[12]。近年来,强烈的人为干扰及土地利用不合理导致石漠化严重,植被恢复是石漠化治理和生态重建的关键步骤[13]。森林与土壤二者相互作用,相互影响[13-14]。不同恢复阶段的植被的特性对土壤微生物多样性的影响不同,因此植被因素成为决定植被生态恢复的关键。为此许多学者研究喀斯特峰丛洼地不同条件下的土壤微生物多样性[15-16],以期能够有效遏制喀斯特地区石漠化现象。但是对于喀斯特地区根际土壤养分、微生物多样性以及土壤-根际-植物三者相互作用还未见报道。研究喀斯特峰丛洼地地区不同恢复阶段的根际与非根际土壤养分分布特征与微生物多样性特征,对于揭示不同恢复阶段、群落类型对土壤养分及微生物的影响极其有效利用机制具有重要意义。本研究以喀斯特峰丛洼地植被恢复过程中的 4 个恢复阶段(草丛、灌丛、次生林、原生林)为研究对象,旨在探明不同恢复阶段根际与非根际土壤养分特征的规律和差异、微生物多样性特征,以期为该地区石漠化治理、生态恢复和重建提供更多科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

本研究区为木论喀斯特国家自然保护区,位于广西环江毛南族自治县西南部(107°54′01—108°05′51E, 25°07′01—25°12′22N)。北连贵州省茂兰国家自然保护区,南接木论川山喀斯特地区,东临古滨河上游,西近打狗河。木论国家自然保护区是世界上喀斯特区域连片面积最大、保存最完好、原生性最强的喀斯特森林,森林覆盖率达 94.8%,属于典型的喀斯特原始森林生态系统,其典型景观单元为峰丛洼地。林区地势起伏较大,地势西北高、东南低,林区地处北回归线北侧,属中亚热带季风气候区。林区总面积为 89.69km^2 年均日照 1451.1h,7 月份月均日照最多,约为 190.7h,2 月份最少,约为 61.5h。年均气温 19.3℃,最高温 36℃,最低温 −5.0℃,≥0℃年活动积温 6260℃,无霜期 310d。年均降水量 1529.2mm,4—8 月为雨季,占全年降水量的 73.7%,9 月至次年 3 月为旱季。

研究区内基岩裸露面积达 80%—90%以上,土壤厚度一般为 10—50cm,且零星分布于岩石缝隙间,洼地或谷地基岩裸露面积占 15%,土壤厚度 20—160cm。林区土壤类型主要为石灰土和少量的硅质土,为非地带性土壤。

1.2 样地设置与样品采集

2014 年 8 月至 10 月,通过实地勘察,在广西环江毛南族自治县喀斯特峰丛洼地草丛、灌丛、次生林和原生林 4 个恢复阶段各选择 3 个代表性群落类型:草丛:白茅(*Imperata cylindrica*)、荩草(*Arthraxon hispidus*)、齿牙毛蕨(*Cyclosorus acuminatus*);灌丛:黄荆(*Vitex negundo*)、长序苎麻(*Ehmeria nivea*)、毛桐;次生林:刀果鞍叶羊蹄甲(*Bauhinia brachycarpa*)、檵木(*Loropetalum chinensis*)、八角枫(*Alangium chinense*);原生林:圆果化香(*Platycarya longipes*)、小果厚壳桂(*Cryptocarya austrokweichouensis*)、青檀(*Pteroceltis tatarinowii*),在坡向、坡度、海拔等基本相同或相似的坡中下位分别建立 3 块面积为 20m×20m 的样方(共计 36 块群落样方)进行植被调查。

每种植物在各自的植物群落中避开主根系按"S"型路线选择 5 株植物,在样方内挖取具有完整根系的土体(体积大小视根系本身的范围而定),先轻轻抖落大块不含根系的土壤,装入塑料袋内,混匀,视为非根际土壤(S);然后用力将根表面附着的土壤全部抖落下来,便获得根际土壤(R)。供试土壤为这 12 种植物的根际与非根际土壤。将各自的所有的土样充分混合,按四分法取一部分土壤,野外重复 3 次。将待测样品分成两部分,一部分带回实验室风干磨碎过筛,待测土壤化学指标;另一部分带回实验室置于 4℃ 恒温冰箱中,待测土壤微生物细菌、真菌。

1.3 土壤养分测定

根据《土壤农业化学分析方法》[17]:土壤 pH 采用电极电位法、有机质(SOC)采用重铬酸钾氧化-外加热法、全氮(TN)采用半微量开氏法-流动注射仪法测定、全磷(TP)采用 NaOH 熔融-钼锑抗显色-紫外分光光度法、全钾(TK)采用 NaOH 熔融-原子吸收法、碱解氮(AN)采用碱解-扩散法、速效磷(AP)采用 0.5mol/L $NaHCO_3$提取-钼锑抗显色-紫外分光光度法、速效钾(AK)采用 NH_4Ac 浸提-原子吸收法。

1.4 土壤微生物测定

1.4.1 土壤 DNA 的提取

土壤微生物基因组 DNA 快速提取专用试剂盒(FastDNA® SPIN Kit for Soil, MP),提取的 DNA 经 1%琼脂糖凝胶电泳检测,并测定其核酸浓度后分装备用。DNA 的浓度及纯度用紫外分光光度计测定(Nanodrop, PeqLab, Germany)。

1.4.2 细菌的聚合酶链式反应

以 1μL 稀释 10 倍后的土壤总 DNA 模板(约 20ng/L),采用 PCR 进行目的片段的扩增。所用引物由英潍捷基(上海)贸易有限公司合成,使用细菌 16S rDNA 通用引物 F341(5′-CCTACGGGAGGCAGCAG-3′)和 R517(5′-ATTACCGCGGCTGCTGG-3′)在 F341-GC 中, 5 端 GC 夹序列为(5′-CGCCCGCCGCGCGCGGCGGGCGGGGCGGGGGCACGGGGGG-3′)。采用模板 1μL,引物各 1μL,Tag 2 * SupperMix 12.5μL,ddH2O 8.5μL,反应体系共 25μL。反应程序:95℃ 预变性 3min,94℃ 30s,56℃ 30s,72℃ 1min,25 个循环,最后 72℃ 延伸 7min,4℃ 保育无穷。扩增产物均取 3μL 于 1%的琼脂糖凝胶中,在凝胶成像系统中检测。

1.4.3 PCR 产物的变性梯度凝胶电泳(DGGE)

DGGE 在 Bio-Rad 通用突变检测系统中进行。将 35μL 细菌 PCR 产物加适量 Loading buffer 混合后加入 8%含变性梯度 40%—60%(10%—40%)聚丙烯酰胺凝胶样孔中(100%的变性剂相当于 7M 尿素和 40%(*v/v*)去离子甲酰胺的混合物)。在 1×TAE 中,60℃、80V 电泳 16h 后,取出经溴化乙锭(EB)染色 15min,在凝胶紫外自动成像系统中拍照(SYNGENE Inc., USA)。

1.5 数据处理

根际富集率 *E*(*Enrichment ratio*)反映养分的富集程度,*E* 值的大小反映土壤性状值在植物根际的富集程度,同时也反映了植物根际效应的强弱,计算公式如下[18-19]:

E =[(根际含量-非根际含量)/ 非根际含量]×100%

丰富度指数:$R=S$;

Shannon-Wiener 指数 $H' = -\sum P_i \times \ln P_i, P_i = N_i/N$;

Pielou 均匀度指数 $J = H'/\ln S$;

式中,S 为物种数目,P_i 为某一条带密度在所有条带密度百分比[20]。

采用 Excel 进行数据整理和初步处理,用 SPSS 21.00 软件进行统计分析,Origin 8.0 进行绘图;多重比较采用 Duncan 法;单因素方差检验显著性差异;所有数据为 3 次重复的平均值,根际与非根际土壤的养分状况采用配对样本 t-检验进行差异性分析。相关性分析采用 Pearson 相关检验。

2　结果与分析

2.1　喀斯特峰丛洼地根际和非根际土壤养分含量变化

由图 1 中可知,4 个恢复阶段植被土壤根际 SOC 养分含量都高于非根际,灌丛 SOC 的根际呈现极显著富集(P<0.01),其他恢复阶段根际与非根际的含量都没有呈现显著差异。4 个恢复阶段植被土壤根际 TN 养分含量都高于非根际,灌丛 TN 的根际呈现极显著富集(P<0.01),草丛、次生林 TN 根际呈现显著富集(P<0.05),原生林 TN 根际富集不显著。

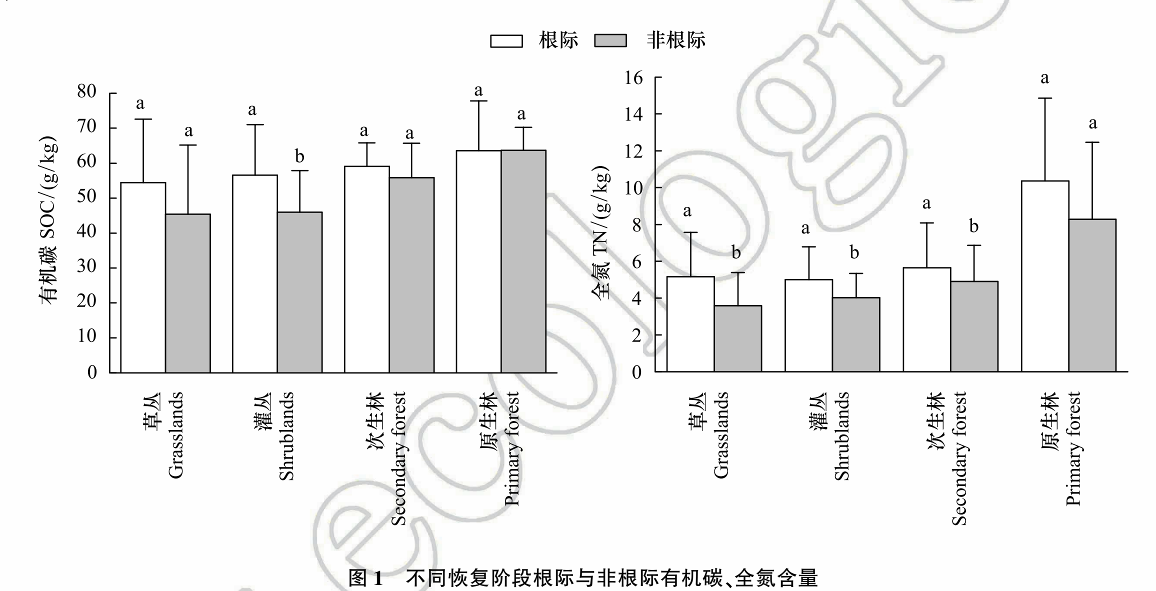


图 1　不同恢复阶段根际与非根际有机碳、全氮含量

Fig.1　SOC and TN in rhizosphere and non-rhizosphere soil under different stage of succession

根际与非根际之间不同小写字母表示差异显著(n=9,P<0.05)

喀斯特峰丛洼地 4 个恢复阶段根际 SOC 富集率大小表现为:灌丛>草丛>次生林>原生林。土壤 TN 富集率大小表现为:草丛>原生林>灌丛>次生林。土壤 TP 富集率大小表现为:草丛>灌丛>次生林>原生林。土壤 TK 富集率大小表现为:次生林>草丛>原生林>灌丛。土壤 AN 富集率大小表现为:草丛>原生林>次生林>灌丛。土壤 AP 富集率大小表现为:原生林>次生林>灌丛>草丛,其中原生林对 AP 的富集率达 126.95%,与其他阶段相差甚大。土壤 AK 富集率大小表现为:原生林>草丛>次生林>灌丛,其中原生林对 AK 的富集率达 82.56%,与其他阶段相差甚大。4 个恢复阶段根际土对 pH 的富集效应虽有富集和亏缺的差别,但是均不显著。

从 4 个恢复阶段植被土壤根际与非根际分别进行单因素方差分析结果比较来看:(1)根际:4 个恢复阶段植被土壤根际的 SOC 含量没有呈明显的差异;TN 含量原生林明显高于其他恢复阶段;TP 含量灌丛含量显著高于草丛;TK 含量草丛、灌丛含量显著高于次生林、原生林;AN 含量原生林显著高于其他恢复阶段;AP 含量各恢复阶段没有呈显著差异;AK 含量次生林显著高于灌丛、原生林;(2)非根际:4 个恢复阶段土壤非根际的 SOC 含量原生林显著高于草丛、灌丛;TN 含量原生林含量显著高于其他植被恢复阶段;TP 含量灌丛含量显著高于草丛;TK 含量草丛、灌丛含量显著高于次生林、原生林;AN 含量原生林显著高于其他恢复阶段;AP 含量

草丛、灌丛显著高于原生林;AK 含量原生林显著低于其他恢复阶段。从整体上来看,在 TN、TP、TK、AN 养分方面,4 个恢复阶段植被根际与非根际的变化趋势与差异都相同;在 AP 方面,主要是因为原生林对 AP 的富集率过高而导致根际与非根际 AP 含量有差异;在 AK 方面,主要是因为灌丛根际的 AK 富集率亏缺较大而导致根际与非根际 AK 含量有差异。

表 1 不同恢复阶段根际与非根际土壤养分比较

Table 1 The soil nutrition of rhizosphere and non-rhizosphere soil under different stage of succession

恢复阶段 Stages	项目 Items	pH	有机碳 SOC(g/kg)	全氮 TN(g/kg)	全磷 TP(g/kg)	全钾 TK(g/kg)	碱解氮 AN(mg/kg)	速效磷 AP(mg/kg)	速效钾 AK(mg/kg)
草丛	根际(R)	6.53±0.36b	54.47±18.11a	5.16±2.40b	3.16±0.78b	9.55±4.49a	172.99±64.01b	23.51±19.63a	86.43±75.20ab
Primary forest	非根际(S)	6.47±0.93B	45.4±19.78B	3.58±1.80B	2.82±0.38B	8.13±4.21A	141.92±65.88B	30.98±22.31A	93.22±58.92A
	富集率/%	0.93	19.98	44.13	12.06	17.47	21.89	−24.11	−7.28
灌丛	根际(R)	7.08±0.64a	56.54±14.52a	4.99±1.79b	4.11±0.71a	9.33±3.20a	147.67±45.11b	31.92±7.71a	54.15±53.07b
Shrublands	非根际(S)	7.05±0.59AB	45.94±11.94B	4.01±1.33B	3.91±0.431A	10.47±3.57A	170.49±46.04B	34.48±16.53A	99.04±68.04A
	富集率/%	0.43	23.07	24.44	5.12	−10.89	−13.39	−7.43	−45.33
次生林	根际(R)	6.81±0.73ab	59.05±6.76a	5.65±2.44b	3.42±0.83ab	4.73±0.79b	174.76±51.79b	20.76±15.07a	135.09±48.71a
Secondary forest	非根际(S)	6.94±0.46AB	55.84±9.85AB	4.90±1.96B	3.61±0.91AB	3.89±2.10B	175.89±32.48B	19.74±14.64AB	147.59±59.38A
	富集率/%	−1.87	5.75	15.31	−5.26	21.59	−0.64	5.17	−8.47
原生林	根际(R)	7.33±0.17a	63.58±14.26a	10.35±4.51a	3.33±0.99ab	4.34±2.61b	282.19±59.35a	30.23±19.16a	39.56±24.72b
Primary forest	非根际(S)	7.32±0.37A	63.72±6.53A	8.28±4.18A	3.61±1.14AB	3.89±1.16B	259.24±112.99A	13.32±7.03B	21.67±6.22B
	富集率/%	0.14	−0.22	25	−7.76	11.57	8.85	126.95	82.56

同列不同的小写字母表示根际养分在不同恢复阶段差异显著($P<0.05$),同列不同的大写字母表示非根际土壤养分在不同恢复阶段显著差异($P<0.05$);R:根际,Rhizosphere;S:非根际,Non-rhizosphere

2.2 喀斯特峰丛洼地土壤微生物多样性变化

由表 2 可知,喀斯特峰丛洼地地区不同恢复阶段根际土壤细菌 shannon-Wiener 指数(H)次生林阶段显著高于其他阶段,灌丛、次生林阶段的根际土壤细菌丰富度指数(S)显著高于草丛、原生林阶段,草丛、次生林阶段的根际土壤细菌均匀度(EH)显著高于灌丛、原生林阶段。灌丛阶段的根际土壤真菌 shannon-Wiener、丰富度指数(H)以及均匀度(EH)显著高于其他阶段。

表 2 不同恢复阶段根际土壤微生物多样性指数

Table 2 The comparison of soil bacteria diversity in rhizosphere soilunder different stage of succession

恢复阶段 Stages	细菌 Bacteria			真菌 Fungi		
	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index(H)	丰富度指数 Richness index (S)	均匀度指数 Pielou evenness index (EH)	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index(H)	丰富度指数 Richness index (S)	均匀度指数 Pielou evenness index (EH)
草丛 Grasslands	3.23±0.10b	25.50±2.38b	0.998±0.00a	2.62±0.19c	16.92±4.03b	0.984±0.00ab
灌丛 Shrublands	3.30±0.05ab	29.67±2.16a	0.986±0.00b	3.23±0.09a	25.08±1.71a	0.994±0.00a
次生林 Secondary forest	3.39±0.04a	29.50±1.04a	0.997±0.00a	2.80±0.02bc	17.08±3.08b	0.973±0.01b
原生林 Primary forest	3.19±0.12b	26.08±2.81b	0.979±0.01b	2.83±0.12b	19.67±3.88b	0.981±0.01b

由表 3 可知,喀斯特峰丛洼地地区不同恢复阶段非根际土壤细菌 shannon-Wiener 指数(H)次生林阶段明显高于原生林阶段,灌丛、次生林阶段的非根际土壤细菌丰富度指数(S)显著高于草丛、原生林阶段,草丛、灌丛、次生林阶段的非根际土壤细菌均匀度(EH)显著高于原生林阶段。灌丛阶段非根际土壤真菌 shannon-Wiener 指数(H)显著高于草丛阶段,灌丛阶段非根际土壤真菌丰富度指数(S)显著高于其他阶段,灌丛阶段非根际土壤真菌细菌均匀度(EH)显著高于次生林、原生林阶段。

综合表 2、表 3 可知,喀斯特峰丛洼地不同恢复阶段细菌多样性、丰富度均高于真菌,根际土壤细菌与真

菌 shannon-Wiener 指数(H)、丰富度指数(S)与均匀度都高于非根际土壤。

表 3　不同恢复阶段非根际土壤微生物多样性指数

Table 3　The comparison of soil bacteria diversity in non-rhizosphere soilunder different stage of succession

恢复阶段 Stages	细菌 Bacteria			真菌 Fungi		
	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index(H)	丰富度指数 Richness index (S)	均匀度指数 Pielou evenness index (EH)	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index(H)	丰富度指数 Richness index (S)	均匀度指数 Pielou evenness index (EH)
草丛 Grasslands	3.18±0.12bc	23.50±1.04b	0.998±0.00a	2.87±0.19b	16.67±4.24b	0.990±0.01a
灌丛 Shrublands	3.23±0.07ab	27.84±1.29a	0.991±0.01a	3.21±0.09a	24.75±1.50a	0.993±0.00a
次生林 Secondary forest	3.33±0.04a	28.17±0.88a	0.997±0.00a	2.56±0.17c	15.75±0.32b	0.978±0.01b
原生林 Primary forest	3.10±0.06c	23.83±0.80b	0.981±0.01b	2.42±0.24c	15.75±1.57b	0.988±0.01a

2.3　喀斯特峰丛洼地土壤理化形状与土壤微生物多样性相关性分析

由表 4 可知,土壤根际 TN 与 pH、SOC 呈极显著正相关($P<0.01$),AN 与 SOC、TN 呈极显著正相关($P<0.01$),AP 与细菌丰富度呈显著负相关($P<0.01$),pH 与 SOC 呈显著正相关($P<0.01$),TP 与 AP 呈显著正相关($P<0.05$),AP 与真菌 Shannon(H)、丰富度(S)呈显著负相关。

由表 5 可知,土壤非根际 pH 与 SOC、TN、TP 呈极显著正相关($P<0.01$),PH 与 AP 呈极显著负相关($P<0.01$),PH 与 AN 与呈显著正相关($P<0.05$),SOC 与 TN、AN 呈极显著正相关($P<0.01$),SOC 与 AP 呈显著正相关($P<0.05$),TN 与 TP、AN 呈极显著正相关($P<0.01$),TP 与 AN 呈极显著正相关($P<0.01$),AK 与真菌均匀度(EH)呈极显著负相关,TP 与真菌丰富度(S)呈显著负相关,TK 与 AP 呈显著正相关($P<0.05$),TK 与细菌 Shannon(H)呈显著负相关。

3　讨论

喀斯特峰丛洼地地区根际土壤养分、土壤微生物多样性主要受植被因素的影响。本研究表明随着土壤植被的恢复,根际土壤有效养分的变化程度高于全量养分(表 1),特别是土壤速效磷和速效钾,这说明土壤有效态养分较全量养分对植被群落恢复的变化响应更为灵敏,这与前人研究结果一致[21]。随着植被的恢复,根际土壤的 SOC 含量逐渐增加,这是由于植被的恢复致使植物的枯落物归还土壤增多,从而增加了土壤有机质,而降低了土壤中的盐分,使得土壤性质得到了改善;原生林阶段的 TN 含量明显高于其他阶段(表 1),因为乔木林活细根生物量[22]和脲酶和碱性磷酸酶活性显著高于灌木林和灌草丛[23],这对分解转化土壤有机氮及其生物有效性有直接影响,因此对土壤中氮素的供应能力也有一定的影响;TP 含量没有明显的变化,说明植被的恢复对 TP,没有显著的影响;TK 含量则是草丛和灌丛明显高于次生林和原生林,这说明次生林和原生林对于钾素的吸收大于其供应。根际与非根际土壤微生物细菌的多样性、真菌的多样性都表现出次生林阶段显著高于其他阶段(表 2、表 3),这可能是由于次生林中所覆盖的植被数量和类型的不同,而导致其微生物群落结构发生变化[24-25]。

大多数研究表明[5-8],植物根际土壤养分含量高于非根际土壤。在本研究中,草丛阶段根际土壤的全量养分都表现明显的富集效应;灌丛阶段根际土壤全量养分除 TK 外均变现明显的富集效应;次生林阶段根际土壤全量养分除 TP 外均表现明显的富集效应;原生林阶段阶段根际土壤全量养分在 SOC、TP 处表现出亏缺现象(表 1)。这是因为在喀斯特地区土壤中,不同的根系分泌物和植物残体以及土壤中 Fe 和 Al 氧化物对根际土壤性质有重要影响[26-27]。原生林生态系统中 AP 的富集率达 126.95%(表 1),明显高于其他恢复阶段,这表明在脆弱的喀斯特生态环境下,植被的恢复与土壤磷素的增加有直接的关系。喀斯特峰丛洼地不同恢复阶段根际土壤细菌与真菌 shannon-Wiener 指数(H)、丰富度指数(S)与均匀度都高于非根际土壤(表 2、表 3),这是因为根际周围土壤养分较多切活跃,有利于土壤微生物的生长,这与前人研究结果一致[28]。

表 4　根际土壤养分影响因子 Pearson 相关性分析

Table 4　Pearson′s correlation coefficients among soil nutrient factors in rhizosphere soil

项目 Items		pH	有机碳 SOC/(g/kg)	全氮 TN/(g/kg)	全磷 TP/(g/kg)	全钾 TK/(g/kg)	碱解氮 AN/(mg/kg)	速效磷 AP/(mg/kg)	速效钾 AK/(mg/kg)	细菌 Bacteria Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index(H)	细菌 Bacteria 丰富度指数 Richness index (S)	细菌 Bacteria 均匀度指数 Pielou evenness index (EH)	真菌 Fungi Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index(H)	真菌 Fungi 丰富度指数 Richness index (S)	真菌 Fungi 均匀度指数 Pielou evenness index (EH)
pH		1													
有机碳 SOC/(g/kg)		0.346*	1												
全氮 TN/(g/kg)		0.489**	0.565**	1											
全磷 TP/(g/kg)		0.322	0.230	0.317	1										
全钾 TK/(g/kg)		−0.193	0.025	−0.117	0.211	1									
碱解氮 AN/(mg/kg)		0.285	0.338*	0.763**	0.176	0.005	1								
速效磷 AP/(mg/kg)		0.197	0.283	0.260	0.396*	0.204	0.214	1							
速效钾 AK/(mg/kg)		−0.208	0.205	0.022	0.144	0.179	−0.039	−0.012	1						
细菌 Bacteria	Shannon-Wiener 指数(H)	−0.446	−0.256	−0.141	−0.381	−0.110	−0.210	−0.201	−0.353	1					
	丰富度指数(S)	−0.010	−0.394	−0.164	−0.272	−0.379	−0.124	−0.640**	0.041	−0.085	1				
	均匀度指数(EH)	−0.126	0.479	0.425	0.089	0.257	0.489	0.290	0.352	0.071	0.027	1			
真菌 Fungi	Shannon-Wiener 指数(H)	−0.204	−0.433	−0.161	−0.162	−0.450	−0.331	−0.580*	0.019	0.399	0.570*	−0.268	1		
	丰富度指数(S)	0.479	−0.318	−0.128	−0.342	−0.344	−0.304	−0.550*	−0.085	−0.006	0.557*	0.085	0.447	1	
	均匀度指数(EH)	0.013	−0.237	−0.097	−0.493	−0.359	−0.189	−0.448	0.189	0.025	0.518*	0.048	0.526*	0.607*	1

** 相关性在 0.01 水平上显著(双尾), * 相关性在 0.05 水平上显著(双尾)

表 5　非根际土壤养分影响因子 Pearson 相关性分析

Table 5　Pearson's correlation coefficients among soil nutrient factors in non-rhizosphere soil

项目 Items	pH	有机碳 SOC/(g/kg)	全氮 TN/(g/kg)	全磷 TP/(g/kg)	全钾 TK/(g/kg)	碱解氮 AN/(mg/kg)	速效磷 AP/(mg/kg)	速效钾 AK/(mg/kg)	细菌 Bacteria			真菌 Fungi		
									Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index(H)	丰富度指数 Richness index (S)	均匀度指数 Pielou evenness index (EH)	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index(H)	丰富度指数 Richness index (S)	均匀度指数 Pielou evenness index (EH)
pH	1													
有机碳 SOC/(g/kg)	0.469**	1												
全氮 TN/(g/kg)	0.463**	0.763**	1											
全磷 TP/(g/kg)	0.443**	0.193	0.469**	1										
全钾 TK/(g/kg)	−0.135	−0.168	−0.288	−.073	1									
碱解氮 AN/(mg/kg)	0.396*	0.759**	0.935**	0.462**	−0.238	1								
速效磷 AP/(mg/kg)	−0.466**	−0.369*	−0.325	0.058	0.331*	−0.250	1							
速效钾 AK/(mg/kg)	−0.037	0.007	−0.182	0.096	−0.072	−0.150	−0.025	1						
细菌 Bacteria Shannon-Wiener 指数(H)	−0.186	−0.152	−0.148	0.163	−0.577*	−0.153	0.230	0.092	1					
丰富度指数(S)	0.371	0.069	0.095	0.113	−0.321	−0.055	−0.118	−0.254	0.622*	1				
均匀度指数(EH)	−0.271	0.308	0.182	−0.356	0.009	0.202	−0.047	0.132	0.532*	0.268	1			
真菌 Fungi Shannon-Wiener 指数(H)	−0.060	0.312	0.231	−0.432	−0.356	0.140	0.124	−0.153	0.187	0.328	0.233	1		
丰富度指数(S)	−0.161	−0.055	−0.105	−0.519*	−0.324	−0.231	0.116	−0.428	0.223	0.383	0.065	0.698**	1	
均匀度指数(EH)	−0.372	0.119	0.076	−0.398	0.413	0.011	0.334	−0.666**	−0.271	−0.124	0.060	0.475	0.414	1

根际土壤 pH 的变化是由于根系呼吸作用释放 CO_2 以及在离子的主动吸收和根尖细胞伸长过程中分泌质子和有机酸所致[29]。在本研究中,4 个恢复阶段根际土对 pH 的富集效应虽有富集和亏缺的差别,但均不显著(表 1),且 pH 值在 6.47—7.33 之间,与于扬等的研究结果(pH 值在 6.60—7.75 之间)一致[30]。这是因为该研究区地处中亚热带,雨热资源丰富的同时导致土壤中的钙、镁流失,加上认为干扰和植物残体的分解[31],使得许多酸性物质进入土壤中和了岩石风化形成的碱性物质。

土壤根际与非根际 pH 均与 TN 呈极显著正相关(P<0.01)(表 4、表 5),这说明 pH 基本与全氮的含量变化保持一致;SOC 均与 TN 呈极显著正相关(P<0.01)(表 4、表 5),这是由于 N 素的来源除微生物固氮或大气沉降外,和 SOC 一样,都大多数来源于植物凋落物的返还和根系分泌的有机物等[32-33],这与谢添等[21]对喀斯特不同生态系统土壤养分的研究结果一致;TN 均与 AN 呈极显著正相关(P<0.01)(表 4、表 5),有效磷与全磷相关性不显著,这是由于土壤中的磷大部分是以难溶性化合物的形式存在,因此土壤中全磷含量较高,但不一定含有较高的速效磷[34];全钾、速效钾含量差异性均不显著,这是因为钾素的影响因素比较复杂,不同的植物群落、根系分泌物、植物残体对根际土壤性质有重要影响[26]。土壤养分中磷素、钾素与土壤微生物多样性表现显著相关性(表 4、表 5),表明土壤微生物的各项生命活动受土壤养分的影响,这与前人研究结果一致[35],但是没有与氮素表现出显著相关性,这其中的缘由有待进一步探索。

由于植被群落恢复,引起的凋落物返还和根系活动发生变化,从而不断地改善着土壤肥力和微生物环境,反过来,土壤肥力和微生物协同演变共同调控植被的物种组成、群落类型、生长发育状况和植被的分布格局。植物-土壤养分-土壤微生物之间相互影响,相互制约。

参考文献(References):

[1] 马斌, 周志宇, 张彩萍, 李雪瑞. 超旱生灌木根际土壤磷的含量特征. 草业学报, 2005, 14(03): 106-110.

[2] Giehl R F H, Gruber B D, Von Wirén N. It's time to make changes: modulation of root system architecture by nutrient signals. Journal of Experimental Botany, 2014, 65(3): 769-778.

[3] Ingram P A, Zhu J M, Shariff A, Davis L W, Benfey P N, Elich T. High-throughput imaging and analysis of root system architecture in *Brachypodium distachyon* under differential nutrient availability. Philosophical Transactions of the Royal Society, 2012, 367(1595): 1559-1569.

[4] 王茹华, 张启发, 周宝利, 廉华, 马光恕. 浅析植物根分泌物与根际微生物的相互作用关系. 土壤通报, 2007, 38(1): 167-172.

[5] 王瑛, 孟亚利, 陈兵林, 周治国, 束红梅, 卞海云. 麦棉套作棉花根际非根际土壤微生物和土壤养分. 生态学报, 2006, 26(10): 3485-3490.

[6] 牛文全, 郭超. 根际土壤通透性对玉米水分和养分吸收的影响. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2785-2791.

[7] 黄刚, 赵学勇, 张铜会, 苏延桂. 科尔沁沙地 3 种灌木根际土壤 pH 值及其养分状况. 林业科学, 2007, 43(8): 138-142.

[8] 张颖娟, 贺寅月, 王斯琴花. 西鄂尔多斯 4 种荒漠珍稀灌木根际土壤养分特征. 水土保持通报, 2012, 32(2): 52-55.

[9] 杨阳, 刘秉儒. 荒漠草原不同植物根际与非根际土壤养分及微生物量分布特征. 生态学报, 2015, 35(22): 7562-7570.

[10] 孟令军, 耿增超, 王海涛, 殷金岩, 姜林, 林伟达. 秦岭太白山区鹿蹄草根际与非根际土壤养分及酶活性研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(5): 157-165.

[11] 白世红, 马风云, 李树生, 姚秀粉. 黄河三角洲不同退化程度人工刺槐林土壤酶活性、养分和微生物相关性研究. 中国生态农业学报, 2012, 20(11): 1478-1483.

[12] 彭晚霞, 王克林, 宋同清, 曾馥平, 王久荣. 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式. 生态学报, 2008, 28(2): 811-820.

[13] 文丽, 宋同清, 杜虎, 王克林, 彭晚霞, 曾馥平, 曾昭霞, 何铁光. 中国西南喀斯特植物群落演替特征及驱动机制. 生态学报, 2015, 35(17): 5822-5833.

[14] Yang X H, Jia Z Q, Ci L J. Assessing effects of afforestation projects in China. Nature, 2010, 466(7304): 315-315.

[15] 卢成阳, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 杨钙仁, 张浩, 鹿士杨, 杜虎. 喀斯特峰丛洼地不同生态系统土壤微生物与养分的耦合关系. 生态学杂志, 2013, 32(3): 522-528.

[16] 何寻阳, 苏以荣, 梁月明, 杨珊, 王克林. 喀斯特峰丛洼地不同退耕模式土壤微生物多样性. 应用生态学报, 2010, 21(02): 317-324.

[17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.

[18] 薛梓瑜, 周志宇, 詹媛媛, 任伟. 干旱荒漠区旱生灌木根际土壤磷变化特征. 生态学报, 2010, 30(2): 341-349.

[19] Rovira A D. Plant root excretions in relation to the rhizosphere effect. Plant and Soil, 1956, 7(2): 178-194.

[20] Müller A K, Westergaard K, Christensen S A, Sørensen S J. The diversity and function of soil microbial communities exposed to different disturbances. Microbial Ecology, 2002, 44(1): 49-58.

[21] 谢添. 不同退化程度喀斯特生态系统中根际土壤的养分变化特征[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.

[22] Majdi H, Persson H. Effects of ammonium sulphate application on the chemistry of bulk soil, rhizosphere, fine roots and fine-root distribution in a *Picea abies* (L.) Karst. stand. Plant and Soil, 1995, 168-169(1): 151-160.

[23] 胡忠良. 贵州中部喀斯特山区不同植被下土壤养分与微生物功能变化研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.

[24] Grayston S J, Griffith G S, Mawdsley J L, Campbell C D, Bardgett R D. Accounting for variability in soil microbial communities of temperate upland grassland ecosystems. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(4/5): 533-551.

[25] Marschner P, Yang C H, Lieberei R, Crowley D E. Soil and plant specific effects on bacterial community composition in the rhizosphere. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(11): 1437-1445.

[26] Zhang C, Liu G B, Xue S, Song Z L. Rhizosphere soil microbial activity under different vegetation types on the Loess Plateau, China. Geoderma, 2011, 161(3/4): 115-125.

[27] Zoysa A K N, Loganathan P, Hedledy M J. A technique for studying rhizosphere processes in tree crops: soil phosphorus depletion around camellia (Camellia japonica L.) roots. Plant and Soil, 1997, 190(2): 253-265.

[28] 安韶山, 李国辉, 陈利顶. 宁南山区典型植物根际与非根际土壤微生物功能多样性. 生态学报, 2011, 31(18): 5225-5234.

[29] 侯杰, 叶功富, 张立华. 林木根际土壤研究进展. 防护林科技, 2006, (1): 30-33.

[30] 于扬, 杜虎, 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 王克林, 鹿士杨, 范夫静, 卢成阳. 喀斯特峰丛洼地不同生态系统的土壤肥力变化特征. 生态学报, 2013, 33(23): 7455-7466.

[31] 杜有新, 潘根兴, 李恋卿, 胡忠良, 王新洲. 贵州中部喀斯特山地不同植被生态系统细根生态特征及养分储量. 应用生态学报, 2010, 21(8): 1926-1932.

[32] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications, 2000, 10(2): 423-436.

[33] 周世兴, 向元彬, 肖永翔, 黄从德, 唐剑东, 罗超, 韩博涵, 梁凯歌. 华西雨屏区天然常绿阔叶林土壤可培养微生物数量对模拟氮沉降的响应. 生态学报, 2017, 37(4): 1191-1198.

[34] 向万胜, 黄敏, 李学垣. 土壤磷素的化学组分及其植物有效性. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 663-670.

[35] 郭静. 原始红松林土壤微生物多样性与土壤理化性质、酶活性的关系[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.

